



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

기술성속도와 애로사슬을 고려한
대형연구개발사업 스케줄링 방법론
연구

A Study on Scheduling Methodology for
Large-Scale R&D Projects using TRL and
Critical Chain

2018 년 02 월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
박진우

기술성속도와 애로사슬을 고려한 대형연구개발사업 스케줄링 방법론 연구

지도교수 나 용 수

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2017년 10월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부 원자핵공학
박 진 우

박진우의 박사 학위논문을 인준함
2017년 12월

위 원 장 황 용 석 (인)

부위원장 나 용 수 (인)

위 원 한 정 훈 (인)

위 원 문 주 현 (인)

위 원 양 지 원 (인)

국문초록

대형연구개발사업은 높은 개발 불확실성으로 인하여 잦은 일정 지연문제를 겪고 있다. 일정지연문제는 사업의 비용을 증가시키며 사업의 신뢰도를 낮추어 투입예산의 감소와 R&D 시설확충 등 과제의 적기 착수를 지연시켜, 다시 사업지연을 야기하는 연쇄적인 문제를 일으키고 있다.

기술로드맵, PERT/CPM 등 대표적인 스케줄링 방법들은 방법의 특성상 대형연구개발사업의 일정지연 문제를 해소하지 못하고 있다. 불확실한 개발일정을 고려하지 못하며, 선행과제의 지연이 후속과제, 특히 시간적 여유시간이 없는 주경로의 지연으로 이어지게 되며, 주경로가 아닌 과제의 지연으로 주요 프로젝트 관리대상인 주경로가 달라지는 등 관리적 측면에서의 한계 역시 가지고 있다.

본 연구에서는 기술성속도가 대형연구개발사업의 개발기간과 연관이 있으며, 과제별로 내재된 여유시간을 모아 별도의 버퍼를 두어 프로젝트의 일정을 관리하는 선행연구에 착안하여, 기술성속도와 일정위험수준을 고려하여 대형연구개발사업의 확률적 일정분포를 계산하고, 버퍼를 두어 사업의 지연을 방지하고 프로젝트 관리가 용이한 방식의 스케줄링 방법론을 개발하였다.

방법론에서는 대상 시스템의 요소기술들을 찾아 전문가평가를 통해 기술별 개발시간과 기술성속도, 일정위험수준을 평가한다. 다

음으로 몬테카를로 방법을 이용하여 확률적 일정지연을 계산하였다. 활동별로 계산된 기간을 최종 시스템의 조립 선후관계를 고려하여 기본일정을 정하면, 여유시간을 제거한 최초 스케줄과의 차이를 비교하여 그 차이만큼을 버퍼로 둔다. 애로사슬일 경우에는 프로젝트 버퍼로 두며, 비애로사슬인 경우에는 공급 버퍼로 둔다. 마지막으로 대형연구개발사업의 주요 제약요인인 R&D 장치 구축 계획 등을 참고하여 계산된 일정을 수정 보완한다.

개발한 방법론의 적용가능성을 알아보기 위하여 핵융합에너지개발사업인 KSTAR 개발사업 일정 자료를 이용하여 검증하였다.

먼저 KSTAR 개발사업의 최초 계획을 이용하여 기술성속도와 일정위험을 평가하고 몬테카를로 방법을 이용하여 KSTAR 건설사업의 확률적 일정분포를 계산하였다.

그 결과 KSTAR의 최초 계획은 일정위험이 매우 높은 계획이었음을 알 수 있었고 1, 2차 수정된 계획에서는 일정위험이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유로는 설계 및 제조 기반기술 R&D의 조기 착수로 일정위험이 낮아진 것으로 분석된다.

다음으로 DEMO 스케줄링을 위하여 방법론을 적용하였다. DEMO 기술체계와 개발시간을 구하고, 기술성속도, 일정위험을 고려하여 확률적 일정분포를 계산하였다. R&D 제약요인에 따라 일정위험을 평가하였고, 일정위험값이 커짐에 따라 DEMO 개발일정에 영향을 준다는 것을 확인하였다. KSTAR 개발사례를 바탕으로 조기에 DEMO 설계 및 제조 기반기술 R&D 등 선행과제를 적기에 수행하여 일정위험을 낮출 필요가 있다.

한편 본 연구에서 개발한 방법론은 핵융합에너지개발사업을 비롯
한 다른 대형연구개발사업 스케줄링에도 적용이 가능하며, 비용,
인력 등 영향인자를 추가로 반영하면 예산계획, 조달계획, 인력계
획 등 사업계획 및 관리를 위한 의사결정도 가능할 것이다.

주요어 : 기술성숙도, 일정위험, 애로사슬, 대형연구개발사업, 스케줄링,
핵융합, KSTAR, DEMO

학 번 : 2009-21048

목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적 및 내용	2
제 2 장 대형연구개발사업과 스케줄링 방법론	3
2.1 대형연구개발사업과 일정위험	3
2.1.1 대형연구개발사업의 정의 및 특성	3
2.1.2 대형연구개발사업 일정위험과 기술성숙도	4
2.2 프로젝트 스케줄링 방법론	6
2.2.1 PERT/CPM	6
2.2.2 CCPM	6
2.3 선행 연구의 한계 및 시사점	9
제 3 장 기술성숙도와 애로사슬을 고려한 대형연구개발 사업 스케줄링 방법론 개발	10
3.1 개발방법론 개요 및 가정	10
3.1.1 방법론의 개요	10
3.1.2 방법론의 가정	11
3.2 기술성숙도와 일정위험을 고려한 확률적 일정 계산	15
3.2.1 기술성숙도 정의 및 평가	15
3.2.2 기술성숙도 확률적 개발시간 분포	16
3.2.3 기술성숙도 활동과 일정위험	16

3.2.4 몬테카를로를 이용한 확률적 일정 계산	17
3.3 애로사슬 평가와 버퍼를 고려한 스케줄링	18
3.3.1 평균개발시간과 시스템개발 일정위험	18
3.3.2 애로사슬의 결정	18
3.3.3 버퍼의 결정과 스케줄링	19
제 4 장 핵융합에너지개발사업 사례를 이용한 방법론 검증 및 스케줄링	20
4.1 핵융합에너지개발사업 사례 선정 배경과 스케줄링 개요	20
4.1.1 사례 선정 배경	20
4.1.2 검증 및 적용 개요	21
4.2 KSTAR 개발사업 사례를 이용한 방법론의 검증	22
4.2.1 개발사업 개요	22
4.2.2 입력자료의 생성	24
4.2.3 계산결과 및 분석	24
4.3 DEMO 개발사업 스케줄링	26
4.3.1 DEMO 개발사업 개요	26
4.3.2 입력자료의 생성	31
4.3.3 계산결과 및 분석	36
제 5 장 결론	38
참 고 문 헌	40
Abstract	42

표 목 차

[표-1] 본 연구의 기술성숙도 정의	15
[표-2] 일정에 미치는 영향에 따른 기술위험수준	17
[표-3] 국가핵융합연구개발 기본계획의 변경	23
[표-4] 한국형 핵융합실증로(K-DEMO)의 3가지 안 및 주요 파라미터	28
[표-5] 핵융합에너지개발 진흥기본계획 추진을 위한 주요 실천과제(안)	30
[표-6] 핵융합 기술체계도	31
[표-7] 핵융합 기술성숙도 평가	33

그 림 목 차

[그림-1] 기술성숙도와 일정지연비율과의 관계	5
[그림-2] 방법론 검증 및 적용 개요	21
[그림-3] KSTAR 개발사업 추진체계	23
[그림-4] KSTAR 개발사업 기간의 확률적 분포	25
[그림-5] 핵융합에너지개발 진흥기본계획	27
[그림-6] 한국형 핵융합실증로(K-DEMO) 개념도	28
[그림-7] DEMO 개발사업 기간의 확률적 분포	37

제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

대형연구개발사업은 높은 개발 불확실성으로 인하여 잦은 일정지연문제를 겪고 있다.

사업일정의 지연은 필연적으로 사업비용의 증가라는 결과를 초래하며, 허용 한계를 벗어나 지연될 경우 사업의 중단으로까지 이어질 수 있으므로, 사업시작초기에 대형연구개발사업의 특성을 파악하고 일정위험요인을 고려하여 전체 사업일정을 수립하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

최근의 대형연구개발사업 관리연구에서는 사업 착수 시 낮은 기술성속도를 가진 사업의 경우 높은 기술성속도를 가진 경우와 비교하여 지연가능성이 높다는 사실이 밝혀졌고(Dubos07), 이를 토대로 기술성속도를 이용한 스케줄링 연구가 시도되고 있다.(Dubos11)

기존의 스케줄링 방법은 사업초기 일정예측의 한계를 가지고 있으며, 선행작업의 지연이 후속작업, 특히 시간적 여유시간이 없는 주경로의 지연으로 이어지고 있다. 또한 주경로가 아닌 과제의 지연으로 주요 프로젝트 관리대상인 주경로가 달라지는 등 관리적 측면에서의 한계 역시 가지고 있다.

최근에는 기존의 주경로 개념에 제약요인을 고려하여 애로사슬을 정의하고, 이 애로사슬의 일정이 지연되지 않도록 버퍼를 두어 전체 사업일정을 준수할 수 있도록 기존의 스케줄링 방법의 개선 연구들이 수행되고 있다.

그러나 일정지연이 빈번하여 일정관리가 필요한 대형연구개발사업을 대상으로 기술성속도와 애로사슬을 함께 고려한 스케줄링 방법론이 아직까지 연구되지 않고 있으므로 본 연구가 필요하다고 할 수 있다.

1.2 연구 목적 및 내용

본 연구는 높은 불확실성을 가진 대형연구개발사업의 일정관리 노력을 줄이기 위하여 대형연구개발사업의 기술성속도와 일정위험을 고려하여 개발일정을 구하고, 애로사슬을 찾아 일부 개발과정 중 발생한 일정지연이 전체사업의 일정지연으로 이어지지 않도록 하는 스케줄링 방법론을 개발하여 정책의사결정을 돕는 것을 본 연구의 목적으로 한다.

위 목적을 달성하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 연구내용과 범위를 가진다.

먼저, 본 연구의 대상으로 하는 대형연구개발사업의 정의 및 특성과 일정지연과정에 대한 이해를 선행연구 조사를 통해 알아본다.

다음으로 기술성속도와 애로사슬 관리를 중심으로 기존 사업들의 스케줄링 방법론을 알아보고, 한계 및 개선방안을 살펴본다.

대형연구개발사업과 스케줄링 방법론 각각에 대한 선행연구를 바탕으로 새로운 스케줄링 방법론을 제안한다.

새로운 스케줄링 방법론의 적용가능성과 한계를 알아보기 위하여 대표적인 대형연구개발사업인 KSTAR 개발사업 사례를 이용하여 방법론을 검증해보고, KSTAR 개발사업 과정에서의 시사점을 찾는다.

다음으로 방법론을 DEMO 개발사업에도 적용하여 향후 DEMO 개발과정에서의 시사점을 얻어내고, 본 연구의 결론과 관련된 정책적 제언을 내리려고 한다.

제 2 장 대형연구개발사업과 스케줄링 방법론

2.1 대형연구개발사업과 일정위험

2.1.1 대형연구개발사업의 정의 및 특성

대형연구개발사업은 대규모 투자와 인력이 소요되고 개발기간도 장기간이 소요되며, 기술적·경제적 파급효과는 막대하지만 위험도가 높은 하이리스크-하이리턴 사업으로 알려져 있다. 민간에서는 고위험, 대규모의 연구개발 투자소요, 장기간의 회임기간을 가진 중요 첨단 기술에 대한 기술개발 투자를 회피하는 경향이 있으므로 대부분의 대형연구개발사업은 국가주도로 추진되고 있다.(윤석환03)

안승구(09)는 대형연구개발사업의 특성을 다음과 같이 정리하였다.

- 국가발전에 필요한 첨단 핵심기술 개발에 역점을 두고 있어 대규모 투자와 인력이 소요되고 개발기간이 장기간 소요됨
- 기술혁신의 핵심적 주체인 민간부문은 고위험, 대규모 투자, 장기간의 회임기간을 가진 중요 첨단기술에 대해 적극적인 기술개발 투자를 회피하는 경향이 있으므로 시장실패를 예방하는 측면에서 국가주도의 목표지향성 필요
- 다학제적인 과학지식과 다양한 요소기술의 창조적 결합을 통해 대형 시스템기술을 개발하는 것을 목표로 장기간에 걸쳐 산학연의 다양한 연구팀이 공동으로 연구할 필요가 있음

이러한 관점에서 안승구(09)의 연구에서는 대형연구개발사업을 ‘국가주도의 목표지향성을 지니고 첨단 핵심기술 개발을 위해 주요 구성원들이 독자적으로 수행하기보다 다학제적인 과학지식과 다양한 요소기술의 창조적 결합을 통해 기술혁신을 성취하고자 하는 프로젝트’로 정의하고 있다.

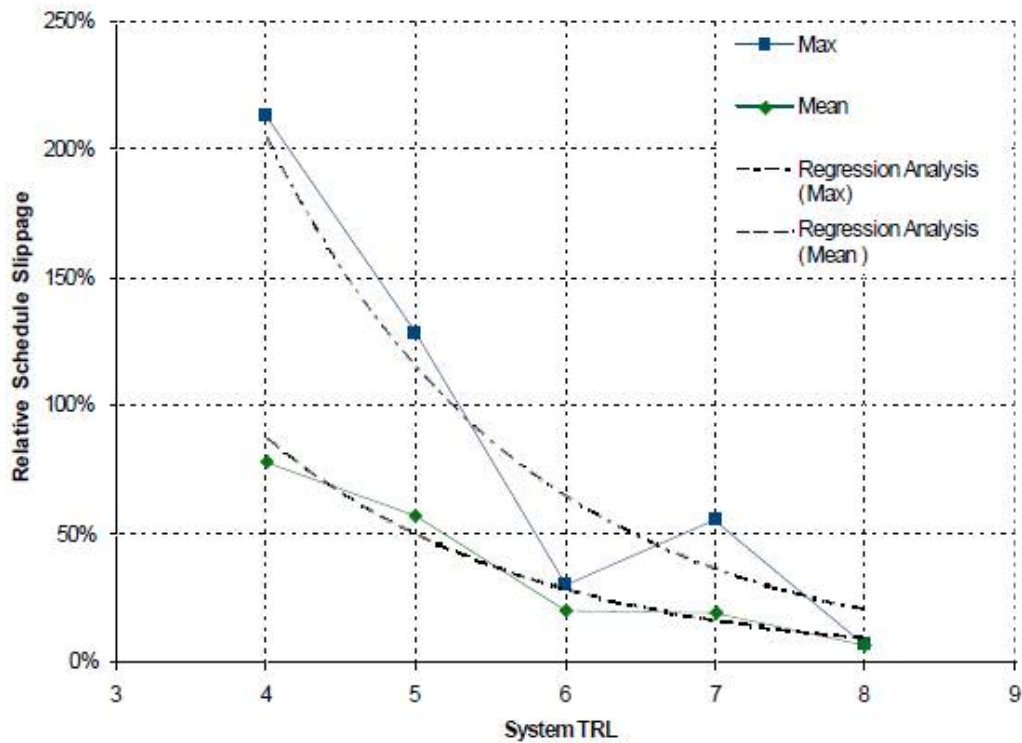
2.1.2 대형연구개발사업 일정위험과 기술성숙도

유형곤(12)은 대형연구개발사업의 하나인 군 연구개발 실패사례의 원인을 정리하였으며, 그 중 일정위험과 관련된 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 기술확보 차질
- 충분히 기술확보가 안된 상태에서 연구 착수
- 연구개발 관리의 미흡
- 지나치게 촉박한 개발 일정

유형곤(12)은 체계개발에서 요구되는 성능수준을 충족할 정도로 충분히 기술을 확보하지 못한 상태에서 개발에 착수한 것이 결국 개발 실패로 이어지거나 일정·비용이 과도하게 증가하게 되는 결과를 초래하는 가장 주요한 요인이라고 하였다. 이 결과는 Dubos(07)의 착수시점의 기술성숙도가 일정지연에 영향을 준다는 연구결과와도 같은 시사점을 주고 있다.

Dubos(07)는 NASA 28개 프로그램의 사업착수시점의 기술성속도와 계획대비 지연된 일정비율과의 상관관계를 분석하고, 이를 토대로 기술성속도에 따른 일정지연 비율을 추정할 수 있는 회귀분석을 통해 모델을 산출하였다.



[그림-1] 기술성속도와 일정지연비율과의 관계 (Dubos07)

2.2 프로젝트 스케줄링 방법론

2.2.1 PERT/CPM

PERT/CPM 방법은 작업의 선후행관계를 고려하여 전체작업의 완료 시간을 결정하고, 추가비용 투입을 고려하여 전체작업 완료시간을 단축하는 네트워크 분석 기법이다.

PERT의 경우 1958년 미 해군 Polaris 미사일 개발 프로젝트의 일정 계획 및 진행과정을 효율적으로 관리하기 위하여 개발되었고, CPM의 경우 1957년 미국의 듀폰(Du pont)사와 레밍톤(Remington)사의 화학 공장 유지 및 관리를 위해 개발되었다. 현재는 PERT와 CPM을 구분하지 않고 PERT/CPM을 함께 사용하고 있다.

하지만 PERT/CPM 기법이 사용되었음에도 불구하고 많은 프로젝트가 지연되는 단점이 나타나고 있어 방법론의 개선을 위한 연구들이 진행되고 있다.

2.2.2 CCPM

Goldratt(1997)은 전통적인 PERT/CPM 방법의 대안으로 제약이론을 기반으로 애로사슬 프로젝트 관리 기법을 제시하였다. 프로젝트마다 고유 불확실성을 고려하여 이러한 불확실성에 대응하는 여유시간을 두어 스케줄링 하게 되는데, 이 여유시간을 다음과 같은 이유에서 낭비하기 때문에 일정지연이 발생한다고 주장하였다.

- 머피의 법칙

잘못될 여지가 있는 일은 꼭 그렇게 되고 만다.

수행 전 예상된 일이 모두 일어나므로, 프로젝트 관리자는 불확실성을 최소로 줄이기 위해 작업시간에 충분한 여유시간을 부여하고, 계획 일정은 그만큼 늘어나게 된다.

- 파킨슨의 법칙

실제 작업시간은 배정된 시간을 매우도록 늘어난다.

어떤 작업이 일찍 완료되어도 상급자에게 과다한 작업시간 책정에 따른 질책만 받게 되므로 작업의 조기 완료는 다음 작업으로 전파되지 않는다.

- 학생증후군

제출일자가 언제든 상관없이 착수시기를 미루는 경향이 있고, 뒤늦게 착수하는 경우 정해진 시기에 완료하지 못하고 지연되는 현상이 있다.

- 부분 최적화

프로젝트 수행자들이 자신의 과업에만 관심을 쏟고 전체 일정 달성에 무관심하기 때문에 전체일정이 지연된다.

- 멀티 태스킹

복수 프로젝트에서 동일 자원을 운영함으로써 작업 변경 때마다 셋업 시간이 필요하고, 각각의 프로젝트 완료시간이 길어지게 된다.

CCPM 방법에서는 상기에서 언급한 여유시간 낭비요인을 제거하기 위하여, 활동시간을 50% 수준의 값으로 조정하도록 제안한다. 각 활동 별로 여유시간을 모아 프로젝트 전체 일정의 지연을 막는 버퍼로 활용한다. CCPM 방법은 비록 각 활동기한을 지키지 못할 위험은 커지지만 여유시간을 낭비하는 요인을 막고 작업의 생산성을 증가시켜 전체 활동기한을 준수할 수 있도록 하고 있다.

그러나 활동시간을 50%로 단축시키고, 여유시간의 절반씩을 모아 버퍼로 두는 방식은 프로젝트 참여자들에게 압박감을 주어 오히려 악영향을 준다는 보고가 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 조재성(08)의 경우 IT업체의 실정에 맞는 간략화한 CCPM 일정관리 기법을 사용하였다. 여유시간을 50%로 두지 않고, PERT 방식처럼 3점 추정에 의해 도출된 예상시간에 낙관적인 시간을 뺀 나머지로 하여 프로젝트 버퍼를 설정하고, 입력된 시간 중 낙관적인 시간을 작업별 소요시간으로 하였다. 이명렬(12)의 경우 비슷한 일을 반복적으로 하는 제조 프로젝트에서는 CCPM 일정 계획 시 다른 종류의 프로젝트보다 불확실성이 적기 때문에 여유시간을 50%로 두는 것이 바람직하지 않다고 판단하여, 여유시간 크기를 달리하여 계획 대비 단축효과를 평가하였다.

2.3 선행 연구의 한계 및 시사점

높은 불확실성을 특성으로 가지는 대형연구개발사업의 일정관리 노력을 줄일 수 있도록 스케줄링하기 위해서는 활동별 개발기간을 예측하고 선행작업의 지연이 후속작업으로 이어지지 않도록 버퍼를 두는 것이 필요하다.

기술성숙도가 낮을 경우 연구개발 일정이 지연되는 것은 여러 선행연구를 통해 보고가 되었지만 기술성숙도에 따라 개발기간의 범위를 모사하고 스케줄링 할 수 있다면 연구개발 일정위험도를 체계적으로 관리할 수 있다.

또한 프로젝트 일정준수를 위해 개발된 CCPM 방법에서는 활동별 50% 여유시간을 제거하여 버퍼를 두고 있는데, 프로젝트마다 불확실성 정도가 다르기 때문에 일괄적으로 버퍼 크기를 정하는 것에 대한 문제가 제기되고 있다. 높은 불확실성을 특성으로 가지는 대형연구개발사업의 개발특성에 맞게 애로사슬을 고려하여 버퍼크기를 정하는 연구가 필요하다.

따라서 기술성숙도에 따라 활동별 개발기간을 예측하고, CCPM 방법에 따라 애로사슬을 고려하고 대형연구개발사업의 개발특성에 맞게 버퍼를 두는 스케줄링 방법을 개발하고자 한다.

제 3 장 기술성속도와 애로사슬을 고려한 대형연구개발사업 스케줄링 방법론 개발

3.1 개발방법론 개요 및 가정

3.1.1 방법론의 개요

본 장에서는 기술성속도와 애로사슬을 고려하여 대형연구개발사업 스케줄링 방법론을 제안하고자 한다.

본 연구에서 제안하는 스케줄링 방법론은 다음과 같다.

1. 먼저 개발대상 대형연구개발사업을 분석한다.
2. 본 연구에서 새롭게 정의하는 기술성속도 수준에 따라 활동을 분류하고, 활동별 기술성속도 평가를 하고, 목표 수준까지 기술성속도 단계별 활동이 있는지 확인한다.
3. 기술성속도 수준으로 개발활동을 정하고 나면 개발시간을 평가하고, 기술력, 유사경험 등을 검토하여 단계별 일정위험수준을 평가한다.
4. 활동별 개발시간과 활동별 일정위험수준을 고려하여 몬테카를로 확률계산을 한다.

5. 계산결과 확률적으로 가장 많은 빈도수를 가지는 일정을 시스템 개발시간으로 하고, 그 때 활동별 평균값을 계산하여 기본일정안을 정한다. 이 기본일정안은 의사결정자의 위험효용에 의해 앞당겨 정할 수도 있다.
6. 기본일정안과 최초 계획에서 여유시간을 제거한 일정을 비교하여 차이를 버퍼로 둔다. 애로사슬인 경우에는 프로젝트 버퍼로 두며, 애로사슬이 아닌 경우는 공급버퍼로 둔다.
7. 마지막으로 주요 제약요인인 R&D 장치 현황 및 계획 등을 참고하여 계산된 일정을 수정보완한다.

3.1.2 방법론의 가정

제안하는 방법론은 적용대상의 다양성, 적용의 편리성을 위하여 다음의 가정을 가진다.

1. 대형연구개발사업의 모든 활동을 기술성숙도 지표로 구분하여 나타낼 수 있다.

기술성숙도 지표는 최초 NASA에서 개발될 당시에는 하드웨어 중심이었으나, 이후에 적용대상의 확대로 소프트웨어, 제조, 산업 분야 등 다양한 범주를 가진 작업들의 성숙도를 평가하는데 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 모든 작업을 기술성숙도로 구분할 수 있다는 가정을 한

다.

2. 하나의 기술 개발 중 같은 기술성숙도 수준에 속하는 활동은 하나의 활동으로 간주한다.

기존의 일반적인 일정계획에서는 활동기준으로 계획을 수립하게 된다. 따라서 같은 기술성숙도 수준 내에서 실제 활동의 수는 많을 수 있다. 기술성숙도 수준에 의해 계획을 수립하기 위하여 명칭이 다른 활동이더라도 같은 기술성숙도 수준에 속하면 하나의 활동으로 간주하였다. 이러한 가정은 제안하는 스케줄링 방법론을 상위 수준의 스케줄링 방법론으로 만들게 된다.

3. 기술성숙도 활동별 내포된 여유시간에 대한 전문가 평가를 얻기 어려운 경우는, 여유시간 크기별로 프로젝트 일정계획 대비 단축일을 평가한 이명렬(12)의 연구결과에 따라 여유시간은 일정치의 20%수준으로 한다.

일반적으로 계획을 수립할 때 프로젝트가 지연될 것을 고려하여 여유시간을 두고 활동계획을 세우게 된다. CCPM 방법은 각 활동별로 산정된 여유시간을 제거하여 전체적으로 관리하자는 것인데, 이 여유시간의 크기는 활동의 특성마다, 계획수립자의 성향에 따라 다르다. 일정에 내재된 여유시간과 일정지연과의 관계를 평가한 이명렬(12)의 연구에 따르면 일정의 20%를 여유시간으로 고려할 때, 일정지연이 가장 적게 발생한다.

따라서 계획수립자 혹은 전문가에게 활동계획 내 여유시간을 자문하

기 어려운 경우는, 일정계획의 20%가 여유시간이라고 가정하는 것이 합리적이다.

4. 여유시간을 제거한 일정보다 단축하여 개발되는 경우는 없다.

대형연구개발사업의 경우 극한기술, 첨단기술 등 세계 최초로 기술을 개발하는 경우가 많고 개발 이후에도 평가 및 검증하는 시간이 필요하여 일반적으로 단축하여 개발되는 것이 어려우며, 경우에 따라 계획보다 앞당겨 개발되었다 하더라도 결과의 완성도 및 신뢰도를 높이기 위하여 주어진 시간동안 개량해나가는 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 대형연구개발사업의 개발특성을 고려하여 최초 예측한 계획에서 여유시간을 제거한 일정보다 단축되어 개발되는 경우는 없다고 가정한다.

5. 일정지연의 이유는 기술위험만 고려한다.

대형연구개발사업 일정지연의 이유는 기술적 위험 뿐만 아니라 정치적, 경제적 요인에 영향을 받는다. 정치적 요인과 경제적 요인은 사업의 착수 또는 중단 등을 결정지을 정도로 영향도가 큰 요인이므로, 본 연구의 범위를 벗어난다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기술적 위험요인만 대형연구개발사업의 일정지연 이유로 고려하기로 한다.

6. 시스템 개발 활동의 시간은 모두 로그정규분포 함수를 따른다고 가정한다.

대형연구개발사업의 시스템 개발 활동은 고유특성에 의해 서로 다른

개발시간 분포를 가질 수 있다. 이명렬(12)은 대형연구개발사업이 아닌 중소기업 제조프로젝트의 개발활동 특성을 고려하여 4가지 개발시간 분포를 고려하였다. Dubos(10)의 연구에서는 대형연구개발사업 중 하나인 우주선 제작과정의 모든 활동을 로그정규분포로 나타내었고, 본 연구에서는 Dubos(10)의 연구에 따라 대형연구개발사업의 모든 활동을 로그정규분포 함수를 따른다고 가정한다.

3.2 기술성속도와 일정위험을 고려한 확률적 일정 계산

3.2.1 기술성속도 정의 및 평가

기술성속도는 최초에 NASA에서 개발된 이후에 그 가치를 인정받아 기술성속도 단계별 정의는 유사하지만 각 분야의 활동 특성에 맞게 변형되어 많은 분야에 적용되고 있다.

한편으로 기술성속도평가의 경우 결과 자체는 객관적이지만, 그 과정에서 관련분야 전문가들의 판단이 매우 중요하게 반영되기 때문에 주관적인 요소가 개입될 여지가 크고 용어의 모호함의 이유로 잘못 해석될 여지가 크다는 단점이 있다.(유형곤12)

본 연구에서는 위와 같은 단점을 해소하기 위하여 대형연구개발사업의 시스템개발과정의 활동을 다음과 같이 9단계의 기술성속도 지표로 구분하여 정의하고자 한다.

[표-1] 본 연구의 기술성속도 정의

기술성속도	본 연구의 정의
1	기본 원리 이해
2	기술개념 형성
3	개념설계
4	기본설계
5	상세설계
6	시제작 및 검증
7	통합 및 검증
8	시운전 및 시험평가
9	운전

3.2.2 기술성숙도 확률적 개발시간 분포

Dubos(10)는 우주선 연구개발 착수시기의 기술성숙도 수준에 따라 개발일정의 시간 분포가 로그정규분포 함수를 가진다고 하였다. 이와 함께 각 기술성숙도 단계를 수행하는 시간의 분포 역시 로그정규분포 함수를 가진다고 하였다.

또한 Dubos(10)는 우주선 연구개발 활동 뿐만 아니라 조립통합, 선적 이송 등 연구개발과 성격이 다른 활동의 시간분포도 로그정규분포를 가진다는 것을 보여주었다. 본 연구에서는 해당 참고문헌 결과를 이용하여 모든 시스템개발과정에서의 활동을 기술성숙도로 구분하고 각 활동의 시간분포가 로그정규분포를 따른다고 가정하였다.

3.2.3 기술성숙도 활동과 일정위험

본 연구는 기술개발의 일정지연에 영향을 미치는 위험요인으로 기술 위험만 고려하였다. 기술위험수준의 기준은 [황형원12, Ashtiani07]을 참고하여 다음과 같이 고려하였다.

[표-2] 일정에 미치는 영향에 따른 기술위험수준

위험	σ	평가 기준
매우 높음	0.5	처음으로 개발되는 부품 및 장비이며 연구개발에 소요되는 기간을 예상할 수 없음
높음	0.4	유사한 개발사례를 참고로 새로운 체계를 구축함
보통	0.3	기존의 개발과정의 많은 확장 및 변화를 통해 응용함
낮음	0.2	기존의 개발과정을 다른 방법으로 응용함
매우 낮음	0.1	기존의 개발과정을 조금 변화하여 적용함

Ashtiani(07)의 연구에 따르면, 로그정규분포의 표준편차가 0.5보다 큰 경우 평균 개발기간의 2배 이상 지연될 가능성이 전체 개발의 10% 이상이 되는 것을 알 수 있다. 개발난이도에 따라 일정이 최초 계획보다 두 배 이상 지연될 수도 있으나, 현실적으로 사업이 중단 또는 종료되는 등 실제와는 맞지 않기 때문에, 표준편차를 0.5까지만 고려하는 것이 합리적이다. 참고문헌에 따라 본 논문에서도 0.1부터 0.5까지만 고려하기로 하였다.

3.2.4 몬테카를로를 이용한 확률적 일정 계산

시스템개발과정의 활동을 기술성속도로 구분하고, 기술성속도별 활동 시간과 위험수준을 평가한 다음, 각 활동의 확률적 값을 계산하기 위하여 몬테카를로 방법을 이용하였다. 엑셀의 LOGNORM.INV 함수와 rand 함수를 이용하여 10,000회 계산하여 로그정규분포의 확률적 일정을 평가하였다.

3.3 애로사슬 평가와 버퍼를 고려한 스케줄링

3.3.1 평균개발시간과 시스템개발 일정위험

몬테카를로 방법에 따라 계산된 시스템개발과정의 활동 일정들을 선후관계를 고려하여 모두 더하면 전체 시스템개발 일정의 분포가 나온다. 이 분포의 평균을 평균시스템개발시간이라고 한다. 의사결정자의 위험효용에 따라 프로젝트 기간을 평균시스템개발시간에 비해 앞당겨 잡을 수도 늦게 잡을 수도 있다.

시스템개발 일정위험은 시스템개발 일정분포에서 프로젝트 기간보다 우측에 있는 면적의 총합을 말하며, 프로젝트 기간보다 지연될 확률의 크기를 의미한다.

3.3.2 애로사슬의 결정

CCPM 방법에서는 제약을 고려하여 가장 길게 형성되는 경로를 애로사슬이라고 두고 있다.

대형연구개발사업에서는 조립순서, 인력과 R&D 시설 및 장치가 제약요인으로 이를 고려하여 계획을 수립해야 한다.

본 연구에서는 전체 시스템개발 일정분포에서 프로젝트 기간을 정하게 되면, 각 활동들의 평균값을 계산하여 각 활동별 일정시간을 계산한다. 조립순서와 R&D 장치 구축계획 등 제약요인을 고려하여 가장 오래 소요되는 기술성숙도 활동들을 연결하면 애로사슬을 결정할 수 있다.

3.3.3 버퍼의 결정과 스케줄링

일반적인 CCPM 방법에서는 작업지연을 방지하기 위하여 애로사슬의 최초 활동기간을 50%로 조정하고, 나머지 50%의 절반씩을 모아 프로젝트 버퍼로 두고 있다. 그런데 기술성숙도 활동의 기간이 수 년에 달하는 대형연구개발사업의 경우 기존의 CCPM 방법으로 버퍼를 계산하게 되면, 버퍼크기가 수 년에 달하는 문제가 발생한다.

이를 해결하기 위하여 확률적 일정 분포를 가지는 활동들의 평균값으로 구해진 각 활동들의 일정과 최초계획에서 여유시간을 제거한 일정값의 차이를 버퍼로 두는 방법을 택하였다. 활동이 애로사슬에 속하는 경우 프로젝트 버퍼로 두고, 비애로사슬인 경우 공급버퍼로 둔다.

제 4 장 핵융합에너지개발사업 사례를 이용한 방법론 검증 및 스케줄링

4.1 핵융합에너지개발사업 사례 선정 배경과 스케줄링 개요

4.1.1 사례 선정 배경

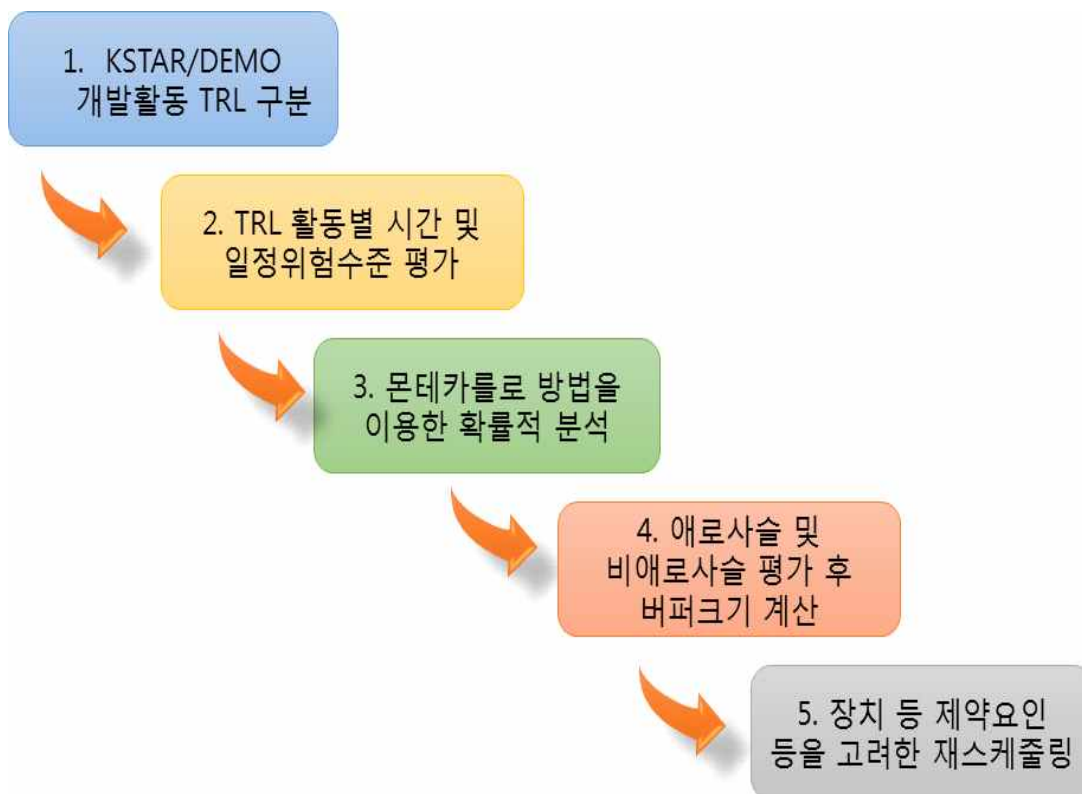
핵융합에너지개발사업은 수소와 같은 가벼운 원자핵의 융합을 통해 방출되는 에너지를 이용하는 발전소 건립을 위한 사업으로, 2040년대 DEMO의 건설 및 운영을 목표로 하고 있는 대표적인 대형연구개발사업이다.

우리나라는 1990년대 이후 우주개발사업, 핵융합에너지개발사업 등 대형 시설 및 장치 개발이 필요한 대형연구개발사업을 본격적으로 추진하였으나, 추진 과정에서 사업기간의 증가, 총사업비의 증가로 사업 추진 과정에서 나타날 수 있는 위험을 사전에 진단하고 개선방안을 마련하는 것이 요구되었다. (국회예산정책처09)

최근 ITER 건설사업의 지연으로 또다시 핵융합에너지개발사업 추진 방식에 대한 우려가 높아진 가운데, 사업추진 당시 자료 이용이 가능한 KSTAR 개발사업 사례를 이용하여 본 연구에서 제안하는 방법론을 검증하고 DEMO 개발사업 추진에의 시사점을 제시하고자 한다.

4.1.2 검증 및 적용 개요

KSTAR 개발사업 일정자료를 이용한 스케줄링 방법론 검증과 DEMO 건설사업 스케줄링 방법 개요는 다음과 같다.



[그림-2] 방법론 검증 및 적용 개요

4.2 KSTAR 개발사업 사례를 이용한 방법론의 검증

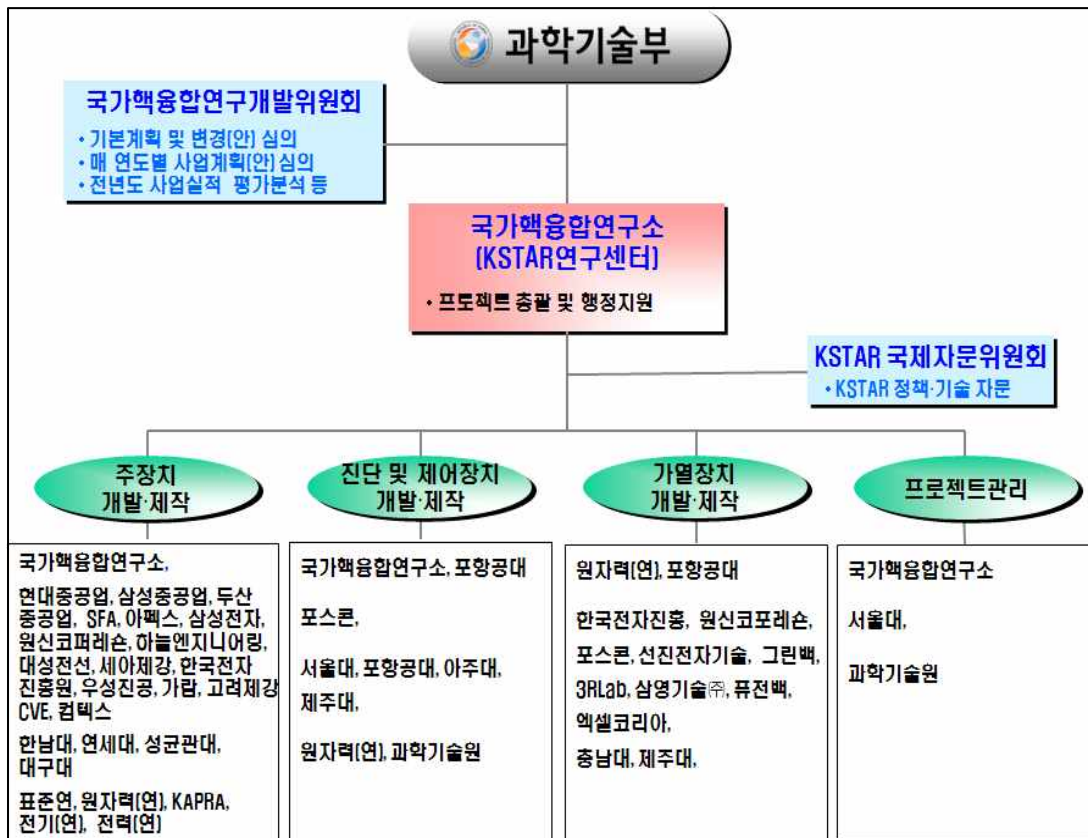
4.2.1 개발사업 개요

KSTAR 개발사업의 정식 명칭은 「차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발·운영사업」으로 ‘차세대초전도핵융합연구장치를 국내기술로 개발·제작하여 선진국 수준의 핵융합연구장치 건설능력 확보’를 사업목적으로 하였다.

총 사업기간은 11년 8개월(1995년 12월부터 2007년 8월), 사업비는 총 3,090억원(정부 2,163억원, 기금 504억원, 민간 등 423억원)이 투입되었으며, 참여기관은 총 39개, 참여인력은 총 1,510 M/Y가 투입되었다.

1단계 사업(95.12.~98.9.)은 개념설계 및 기반기술 R&D가 수행되었으며, 2단계 사업(98.9.~02.6.)은 개발 인프라 구축 및 공학설계, 3단계 사업(02.6.~07.8.)은 장치 제작·설치 및 조립완료로 추진되었다. 우리나라는 2007년 9월 14일 KSTAR 완공식 개최와 함께 핵융합연구장치 건설기술 확보를 선언하였다.

KSTAR 개발사업의 주요성과로는 핵융합 연구장치 건설의 원천기술 확보 및 국내산업체 기술경쟁력 강화, 국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업 합류, 미국, 일본, EU 등과의 전략적 국제공동협력 기반 마련, 향후 핵융합실증로 및 상용핵융합로 건설을 위한 기술자료 축적 등이 있다. (국가핵융합연구소07)



[그림 -3] KSTAR 개발사업 추진체계

KSTAR 개발사업은 기술적 난제해결 과정에서의 R&D 업무 추가, 설계변경·보완, 환율·물가상승에 의한 연구개발비용 증가 및 투자지원 등으로 사업일정의 변경이 불가피하였다. KSTAR 개발사업에서는 [표-3]과 같이 총 2차례의 사업기간이 변경되었다.

[표-3] 국가핵융합연구개발 기본계획의 변경

구분	당초계획	수정계획	비고
1차 변경	1995.12~2002.8	1995.12~2004.12	2년 4개월 연장
2차 변경	1995.12~2004.12	1995.12~2007.8	2년 8개월 연장

4.2.2 입력자료의 생성

본 연구에서 제안하는 방법론에 따라 스케줄링하기 위하여 최초 KSTAR 계획자료를 이용하였다.

기술성숙도로 구분된 사업이 아니므로 기술성숙도와 직접적으로 관련된 자료를 확보하는 것은 어려웠으며, KSTAR 초기 계획자료를 바탕으로 기술성숙도 활동을 구분하고 활동별 일정값을 얻었다.

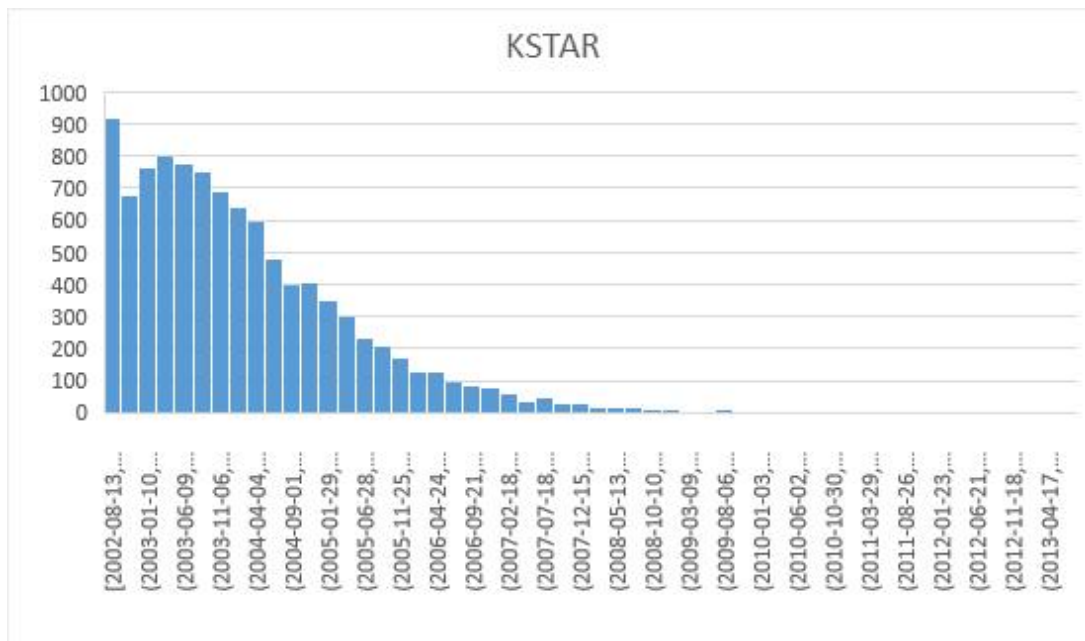
국내에서 최초로 본격적인 핵융합연구개발사업을 시작하는 것인만큼 일정위험수준은 ‘높음’ ($\sigma=0.4$)으로 평가하였다.

4.2.3 계산결과 및 분석

기술성숙도별 일정값과 일정위험수준값으로 로그정규분포함수를 만들고, 몬테카를로 확률적 계산을 통하여 KSTAR 개발사업의 확률적 일정 분포를 계산하였다.

그 결과 평균시스템개발일은 2004년 3월로, 사업이 더 지연될 수 있었던 일정위험값은 41%로 평가되었다. KSTAR 개발사업의 일정범위는 최소 2002년 8월, 최대 2013년 8월로 평가되었다.

KSTAR 개발사업 초기 계획으로 세운 2002년 8월은 96%의 확률로 지연될 가능성이 컸으며, 1차 변경한 2004년 12월의 경우 22%의 확률로 지연될 가능성이 컸다. 최종적으로 사업이 종료된 2007년 8월의 경우 1.8%의 확률로 지연될 가능성이 있었던 것으로 계산되었다.



[그림-4] KSTAR 건설사업 기간의 확률적 분포

KSTAR의 최초 계획은 일정위험이 매우 높은 계획이었음을 알 수 있었고 1, 2차 수정된 계획에서는 일정위험이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유로는 설계 및 제조 기반기술 R&D의 조기 착수로 인하여 일정위험이 낮아진 것으로 분석된다.

4.3 DEMO 개발사업 스케줄링

4.3.1 DEMO 개발사업 개요

우리나라는 핵융합에너지의 실용화 자립기술 개발을 위한 국가적 추진전략을 마련해 체계적으로 사업을 추진하기 위하여 2007년 제1차 핵융합에너지개발 진흥기본계획을 시작으로 매 5년마다 국가 차원의 계획을 수립하고 있다.

한국형 핵융합실증로(K-DEMO)는 본격적인 핵융합상용로 운전에 앞서 최종단계로 핵융합에너지 전기생산 실증을 목적으로 하고 있다. 한국형 핵융합실증로(K-DEMO)는 공학적 실현 가능성을 높이기 위해 국제 핵융합실험로 ITER와 비슷한 크기를 가지지만 자기장의 세기를 높여 성능을 높이는 접근 방법을 채택하고 있다. 현재 한국형 핵융합실증로는 3가지 안이 고려되고 있으며, 그 중 유력한 Option II의 개념도는 [그림-6]과 같다.



‘ 핵융합에너지 실용화 기술개발로 지속가능한 국가 신에너지 확보 ’

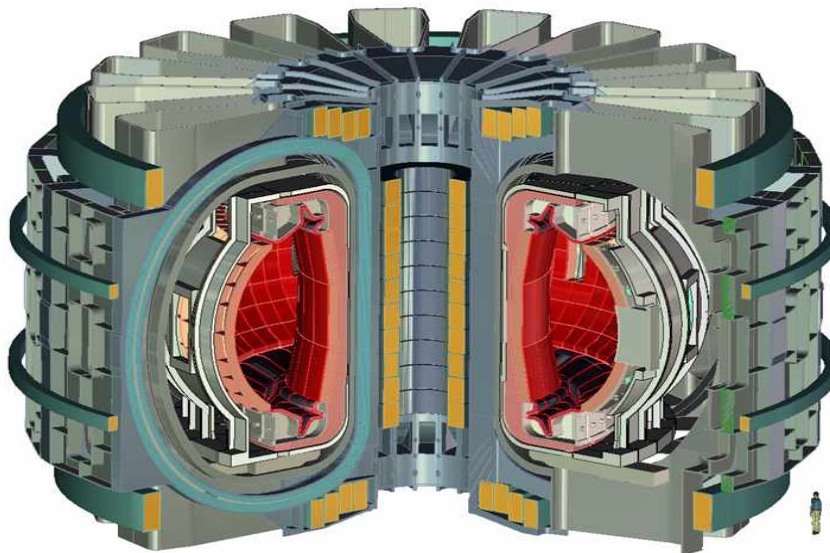
단계	1단계('07~'11)	2단계('12~'21)	3단계('22~'36)
정책 목표	핵융합에너지개발 추진기반 확립	DEMO 플랜트 기반기술 개발	핵융합 발전소 건설능력 확보
기본 방향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 국내 KSTAR장치 운영 기술확보 ▪ 국제공동 ITER 건설 참여 ▪ 핵융합로 공학기술 개발 체계 구축 ▪ 연구개발 및 응용기술의 기반구축 및 저변 확대 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ KSTAR고성능 플라즈마 달성 및 ITER 운전준비 ▪ ITER 완공기여 및 핵심기술 확보 ▪ DEMO 설계 핵심기술 개발 ▪ 핵융합·플라즈마 기술 사업화 및 핵융합 연구개발 기반 확대 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DEMO 설계, 건설 및 전기생산 실증 ▪ ITER 운영 핵심역할 수행 ▪ 핵융합동력로 노심설계 및 계통설계 완료 ▪ 핵융합 기술의 산업화 및 국제시장 선점
진흥기본계획	1차 진흥기본계획('07~'11)	2차 진흥기본계획('12~'16) 3차 진흥기본계획('17~'21)	4차진흥기본계획('22~'26) 5차진흥기본계획('27~'31) 6차진흥기본계획('32~'36)

1단계('07~'11)	2단계('12~'26)			3단계('27~'41)		
1차 진흥기본계획('07~'11)	2차 진흥기본계획('12~'16)	3차 진흥기본계획('17~'21)	4차 진흥기본계획('22~'26)	5차 진흥기본계획('27~'31)	6차 진흥기본계획('32~'36)	7차 진흥기본계획('37~'41)

[그림-5] 핵융합에너지개발 진흥기본계획

[표-4] 한국형 핵융합실증로(K-DEMO)의 3가지 안 및 주요 파라미터

주요 파라미터		Option I	Option II	Option III
Major Radius	[m]	6.0	6.65	7.15
Minor Radius	[m]	1.8	2.0	2.2
Elongation		1.8		
Magnetic Field(B_0)/Peak Field	[T]	7.5 / ~ 16		
Divertor Type		Double Null (or Single Null)		
Bootstrap Current Fraction		~ 0.6		
Normalized beta		~ 4.0		
Safety Factor (q_{95})		3.5~5.0		
Plasma Current	[MA]	> 10	> 12	> 13
Total Fusion Power (Neutron)	[MW]	1700	2130	2721
Q-value		24	27	30
Total H&CD Power	[MW]	70	80	90
Thermodynamic Efficiency		0.35		
Gross Electric Power	[MW]	767	958	1220
Recirculating Fraction		0.7	0.6	0.55
Recirculating Electric Power	[MW]	537	575	671
Net Electric Power	[MW]	230	383	549



[그림-6] 한국형 핵융합실증로(K-DEMO) 개념도

2017년부터 추진되고 있는 제 3차 핵융합에너지개발 진흥기본계획에서는 핵융합실증로 개발을 위한 주요 실천과제(안)을 [표-5]와 같이 정리하였고, 해당 내용을 요약하면 다음과 같다.

2017년부터 2021년까지의 제 3차 기본계획 기간에는 ‘핵융합로공학 기술개발 추진기반 확립’이라는 정책목표를 가지고 ‘DEMO 개념 정의’ 단계 활동을 수행한다.

2022년부터 2026년까지의 제 4차 기본계획 기간에는 ‘DEMO 개념 설계 및 핵융합로공학 기반기술 개발’이라는 정책목표를 가지고 ‘DEMO개념설계’ 단계 활동을 수행한다.

2027년부터 2031년까지의 제 5차 기본계획 기간에는 ‘DEMO 공학 설계 및 핵융합로 기술 선도’라는 정책목표를 가지고 ‘DEMO 공학설계 · 부지선정 · 인허가’ 단계 활동을 수행한다.

2032년부터 2036년까지의 제 6차 기본계획 기간에는 ‘DEMO 건설’이라는 정책목표를 가지고 ‘DEMO 건설’ 단계 활동을 수행한다.

2037년부터 2041년까지의 제 7차 기본계획 기간에는 ‘DEMO 건설 및 운전’이라는 정책목표를 가지고 ‘DEMO 건설 및 운전’ 단계 활동을 수행한다.

상기 과제의 지연착수 없이 추진한다면 2040년대 DEMO 건설 및 운전 목표를 달성할 것으로 보고 있다.

[표-5] 핵융합에너지개발 진흥기본계획 추진을 위한 주요 실천과제(안)

기본 계획	정책목표	주요 실천과제	DEMO
2단계(' 12~' 26) DEMO 플랜트 기반기술 개발			
3차 (17~ 21)	핵융합로 공학 기술개발 추진기반 확립	<ul style="list-style-type: none"> ○ KSTAR를 활용한 핵융합로 핵심 운전기술 개발 ○ ITER 사업을 통한 핵융합로공학 기반기술 확보 ○ DEMO 개발에 필요한 핵심기술 확보 전략 수립 및 기반 구축 ○ 핵융합 연구 기반 및 인재 양성 체계 강화 ○ 핵융합 에너지 개발 지지기반 확대 	개념정의
4차 (22~ 26)	DEMO 개념설계 및 핵융합로 공학 기반기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ KSTAR 업그레이드를 통한 DEMO 선행기술 연구 ○ ITER 건설 완료 및 운영 준비 ○ DEMO 개념설계 ○ 핵융합로공학 시험시설 구축 및 기반기술 개발 ○ 부지선정 준비 및 인허가를 위한 관련 법·제도 정비 	개념설계
3단계(' 27~' 41) 핵융합발전소 건설능력 확보			
5차 (27~ 31)	DEMO 공학설계 및 핵융합로 기술 선도	<ul style="list-style-type: none"> ○ ITER를 활용한 핵융합로 통합 및 운전 기술 검증 ○ DEMO 공학설계 ○ 고유 저방사화 재료 검증 등 핵융합로 선도기술 개발 ○ 부지선정 및 환경영향평가, 인허가 	공학설계 , 부지선정 , 인허가
6차 (32~ 36)	DEMO 건설	<ul style="list-style-type: none"> ○ ITER 운전을 통한 고출력 연소 플라즈마 운전기술 검증 ○ ITER TBM 평가 및 연료순환 검증 ○ 핵융합로 기술 고도화 ○ DEMO 건설 	건설
7차 (37~ 41)	DEMO 건설 및 운전	<ul style="list-style-type: none"> ○ DEMO 건설 및 통합 시운전 ○ DEMO 전기생산 실증 ○ 핵융합 발전소 설계 기술 확보 ○ 핵융합 기술 산업화 	건설 및 운전

4.3.2 입력자료의 생성

본 연구에서 제안하는 방법론에 따라 스케줄링하기 위하여 제 3차 핵융합에너지개발 진흥기본계획 수립 당시 전문가 패널을 구성하여 도출된 핵융합 기술체계도를 이용하였다. 당시 도출된 핵융합 기술체계도는 7대 분류, 16중분류, 41소분류 기술로 구성되어 있다.

[표-6] 핵융합 기술체계도

대분류	중분류	소분류
핵융합 노심기술	핵융합 플라즈마 운전 기술	운전 시나리오 기술
		핵융합 플라즈마 동특성 통합 제어기술
		핵융합 노심 플라즈마 시뮬레이터 기술
핵융합 시스템 통합 기술	핵융합 통합설계 기술	시스템 설계 통합 기술
		핵융합 Code & Standard
		설계 표준화 기술
	핵융합 조립/유지/보수 기술	핵융합로 조립 설치 기술 핵융합 무인원격 유지보수 기술
핵융합 부품소재 기술	핵융합 구조재 기술	저방사화 소재 기술 대용량 소재제조 및 용접/접합 기술
		대면재 합금/복합 재료 기술 대면재 접합 및 특성평가 기술
	핵융합 기능소재 기술	삼중수소 증식재 기술 중성자 증배재 기술 기능소재 성능검증 기술
		구조재 물성 DB 구축 및 조사성능 검증 기술
		재료 물성 DB 구축 중성자 조사성능 검증기술 재료손상 전산모사 기술
핵융합 핵심장치 기술	토카막 핵심장치 기술	초전도 재료 기술 초전도 도체 기술

대분류	중분류	소분류
	기타 핵심장치 기술	진공용기 기술
		중성입자빔 장치 기술
		RF 가열장치 기술
		진단장치 기술
		통합운전 제어기술
핵융합 동력변환계통 기술	블랑켓 시스템 기술	블랑켓 설계 기술
		블랑켓 제작 및 시험평가 기술
	디버터 시스템 기술	고성능 디버터 설계기술
		고열유속 냉각 기술
핵융합 연료주기 기술	연료주기 요소 공정 기술	연료주기 연료공급 기술
		연료주기 진공배기 기술
		중식블랑켓 삼중수소 회수 기술
		연료주기 수소동위원소 분리 및 정제 기술
		연료주기 연료저장 기술
		연료주기 탈삼중수소 기술
	연료순환 계통 통합 기술	삼중수소 누설 방지 기술
		삼중수소 측정 및 재고 관리 기술
		삼중수소 연료주기 통합 기술
핵융합 안전 및 인허가 기술	안전성 평가 기술	정상 운전/사고 시 안전성 평가 기술
		안전해석기술
	안전규제 및 인허가 기술	핵융합 안전 규제 및 인허가 기술

제 3차 핵융합에너지개발 진흥기본계획 수립 당시에는 NASA에서 개발한 기술성숙도 정의에 따라 핵융합상용로를 9단계로 두고 기술성숙도가 평가되었다. 당시의 기술성숙도 평가자료는 [표-7]과 같다. 본 연구에서 제안하는 방법론에서는 NASA 기술성숙도의 정의가 아니라 시스템개발활동에 따라 기술성숙도를 새롭게 정의하고 있으므로, NASA 기술성숙도 정의에 따라 평가된 기술성숙도와 개발현황을 고려하여 본 연구에 맞도록 기술성숙도를 조정하였다.

[표-7] 핵융합 기술성숙도 평가

소분류	기술성숙도								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
운전 시나리오 기술				complete d	Now, 미국				
핵융합 플라즈마 동 특성 제어기술			complete d	Now	미국				
핵융합 노심 플라즈 마 시뮬레이터 기술		complete d	Now		미국,EU				
시스템 설계 통합 기 술		complete d	Now		미국,EU				
핵 융 합 Code&Standard		complete d	Now		미국,EU				
설계 표준화 기술		complete d	Now		미국,EU				
핵융합로 조립 설치 기술			complete d	Now	EU				
핵융합 무인원격 유 지보수 기술	complete d	Now			EU				
저방사화 소재 기술			complete d	Now	일,EU				
대용량 소재제조 및 용접/접합 기술			complete d	Now	일,EU				
대면재 합금/복합 재 료 기술	complete d	Now		일,EU					
대면재 접합 및 특성 평가 기술		complete d	Now	일,EU					
삼중수소 증식재 기 술		complete d	Now	미,일,EU					

소분류	기술성숙도								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
중성자 증배재 기술	complete d	Now		미,일,EU					
기능소재 성능검증 기술	complete d	Now		미,일,EU					
재료 물성 DB 구축			complete d	Now	일,EU				
중성자 조사성능 검 증기술		complete d	Now		일,EU				
재료손상 전산모사 기술	complete d	Now			미,일,EU				
초전도 재료 기술				complete d	Now, 미,일,EU				
초전도 도체 기술				complete d	Now, 미,일,EU				
진공용기 기술					complete d	Now			
중성자빔 장치 기술		complete d	Now		EU				
RF 가열장치		complete d	Now	미,일,EU					
진단장치 기술		complete d	Now	EU					
통합운전 제어기술			complete d	Now	미,일,EU				
블랑켓 설계 기술		complete d	Now	EU					
블랑켓 제작 및 시험 평가 기술		complete d	Now	EU					
고성능 디버터 설계 기술	complete d	Now		EU					
고열유속 냉각 기술	complete d	Now		EU					
연료주기 연료공급 기술		complete d	Now	EU					
연료주기 진공배기 기술		complete d	Now	EU					
증식블랑켓 삼중수소 회수 기술		complete d	Now, 일,EU						
연료주기 수소동위원 소 분리 및 정제 기술	complete d	Now		미,EU					
연료주기 연료저장 기술		complete d	Now	미,일,EU					
연료주기 탈삼중수소 기술	complete d	Now		미,일,EU					
삼중수소 누설 방지 기술	complete d	Now		미,일,EU					

소분류	기술성숙도								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
삼중수소 측정 및 재고 관리 기술	completed	Now		일,EU					
삼중수소 연료주기 통합 기술	completed	Now		미,일,EU					
정상 운전/사고 시 안전성 평가 기술				completed	Now	미,EU			
안전해석 기술					completed	Now, 미, EU			
핵융합 안전 규제 및 인허가 기술				completed	Now	EU			

기술성속도별 활동의 시간은 전문가패널의 평가결과에 기초하여 기술 성장곡선인 Pearl 모형식을 이용하여 계산하였다.

전문가패널이 NASA 정의를 이용하여 도출한 기술성속도지표에는 R&D 및 설계과정만 포함되고, 건설사업에서의 조달, 조립통합, 시운전 과정은 포함되지 않는다.

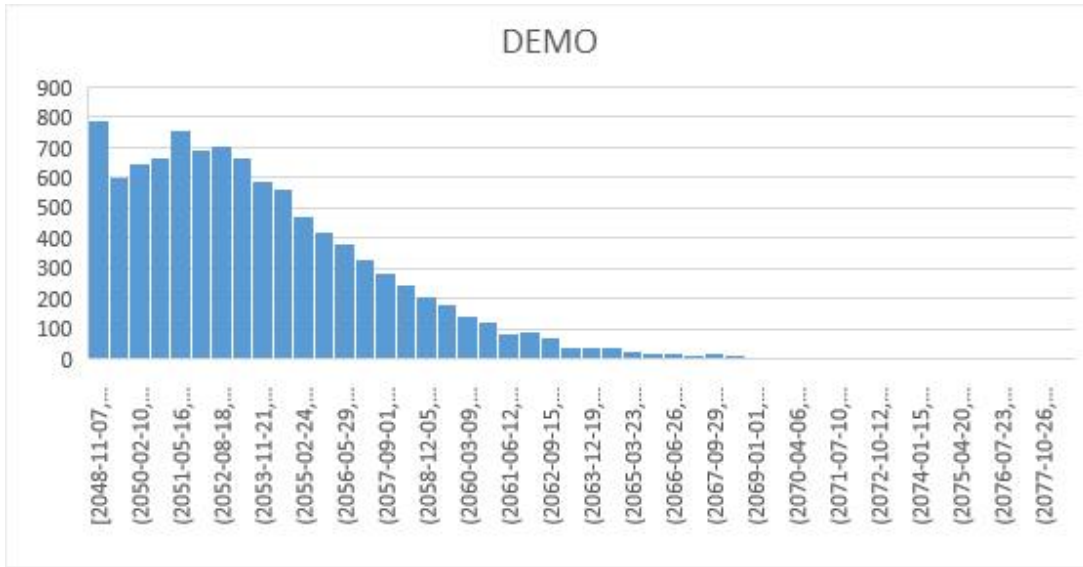
DEMO 스케줄링을 위하여 기술개발 연관과정을 고려하여 설계과정에서의 일정은 ‘통합설계기술개발’ 항목을 이용하여 기술성속도 활동을 구분하여 일정을 계산하였으며, 건설과정에서의 일정은 KSTAR의 건설 일정값을 이용하였고, 일정위험을 높음으로 두고 계산하였다.

4.3.3 계산결과 및 분석

새롭게 정의한 기술성속도별 일정값과 일정위험수준값으로 로그정규 분포함수를 만들고, 몬테카를로 확률적 계산을 통하여 DEMO 개발사업의 확률적 일정분포를 계산하였다.

그 결과 평균시스템개발일은 2054년 2월로, 사업이 더 지연될 일정위험값은 42%로 평가되었다. DEMO 개발사업의 일정범위는 최소 2048년 11월, 최대 2078년 8월로 평가되었다. 3차 기본계획에서 계획하고 있는 2041년의 일정위험값은 99%로 평가되었다.

현재의 우리나라 핵융합기술수준은 기술별 성속도 격차가 크게 벌어져있다. 향후 설계단계를 마치고 차질없이 체계개발로 넘어가기 위해서는, KSTAR 개발사례 결과를 바탕으로 미성숙된 기술개발을 대상으로 DEMO 기반기술 R&D 등 선행과제를 적기에 수행하여 일정위험을 낮추는 것이 요구된다.



[그림-7] DEMO 개발사업 기간의 확률적 분포

제 5 장 결론

본 연구에서는 불확실성이 높은 대형연구개발사업의 특성을 고려한 스케줄링 방법론을 개발하기 위하여 대형연구개발사업 활동을 기술성속도로 구분하고 일정위험을 고려함으로써, 사업일정을 확률분포로 나타내고 일정리스크를 평가할 수 있었다. 높은 일정위험을 갖는 활동의 지연이 전체사업의 지연에 영향을 줄 수 있는 경우에는 버퍼를 뒀으로써 전체사업의 일정위험을 줄이는 것이 가능하였다.

개발한 방법론의 적용가능성을 알아보기 위하여 핵융합에너지개발사업인 KSTAR 개발사업의 일정 자료를 이용하여 검증하였다.

먼저 KSTAR 개발사업의 최초 계획을 이용하여 기술성속도와 일정위험을 평가하고 몬테카를로 방법을 이용하여 KSTAR 개발사업의 확률적 일정분포를 계산하였다.

그 결과 KSTAR의 최초 계획은 일정위험이 매우 높은 계획이었음을 알 수 있었고 1, 2차 수정된 계획에서는 일정위험이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유로는 설계 및 제조 기반기술 R&D의 조기 착수로 일정지연위험이 낮아진 것으로 분석된다.

다음으로 DEMO 스케줄링을 위하여 방법론을 적용하였다. DEMO 기술체계와 개발시간을 구하고, 기술성속도, 일정위험을 고려하여 확률적 일정분포를 계산하였다. R&D 제약요인에 따라 일정위험을 평가하였고, 일정위험값이 커짐에 따라 DEMO 개발지연에 영향을 준다는 것을 확인하였다. KSTAR 개발사례를 바탕으로 조기에 DEMO 설계 및 제조 기반기술 R&D 등 선행과제를 적기에 수행하여 일정위험을 낮출 필요가 있다.

한편 본 연구에서 개발한 방법론은 핵융합에너지개발사업을 비롯한

다른 대형연구개발사업 스케줄링에도 적용이 가능할 것이며, 비용, 인력 등 요인을 추가로 반영하면 예산계획, 조달계획, 인력계획 등 사업계획 및 관리를 위한 의사결정도 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Behzad Ashtiani, et al.(2007), “A new approach for buffer sizing in Critical Chain scheduling” , Proceedings of the 2007 IEEE IEEM
- [2] Eliyahu M. Goldratt, 「Critical Chain」 , The North River Press(1997)
- [3] Gregory F. Dubos, et al.(2007), “Technology Readiness Level, Schedule Risk and Slippage in Spacecraft Design: Data Analysis and Modeling” , AIAA Space
- [4] Gregory F. Dubos(2011), “Spacecraft technology portfolio: Probabilistic modeling and implications for responsiveness and schedule slippage” , Acta Astronautica 68 1126–1146
- [5] 국가핵융합연구개발위원회(2001), 국가 핵융합 연구개발 기본계획 변경(안)
- [6] 국가핵융합연구개발위원회(2004), 국가 핵융합 연구개발 기본계획 변경(안)
- [7] 국회예산정책처(2009), 대형연구개발사업 평가:핵융합에너지개발사업을 중심으로
- [8] 서울대학교(2013), 핵융합실증로 핵심기반기술 개발사업 기획연구 최종보고서
- [9] 서울대학교(2017), 제3차 핵융합에너지개발 진흥기본계획 수립을 위한 기획연구 최종보고서
- [10] 안승구(2009), “대형 국책연구개발사업의 성과 및 성공요인 분

석-차세대 성장동력사업을 중심으로-” , KISTEP

[11] 유형곤(2012), “방위력개선사업에서 기술성숙도평가(TRA) 방법론의 효과적인 적용방안” , 안보경영연구원

[12] 윤석환(2003), “연구개발 대형화에 대응한 평가제도 설계방향” , 한국행정학회 하계학술대회

[13] 이명렬(2012), “프로젝트에 CCPM 적용에 있어서 프로젝트 버퍼 설정 방법에 관한 연구 - 중소기업 제조프로젝트를 중심으로” , 한국프로젝트경영연구, 제2권 제1호, pp.17-29

[14] 조재성(2008), 소규모 IT업체를 위한 프로젝트 일정 관리 시스템 모델링에 관한 연구, 석사학위논문, 울산대학교

[15] 황형원(2012), “항공우주개발 프로젝트에서 개발기간과 비용에 대한 기술성숙도의 영향 분석” , 한국항공우주학회지

Abstract

A Study on Scheduling Methodology for Large-Scale R&D Projects using TRL and Critical Chain

Park Jinwoo

Department of Energy System Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Large-scale R&D projects are experiencing frequent delays due to high development uncertainties. Schedule delay issues are creating a series of problems that are causing delays in projects by increasing the cost of projects and thereby reducing the reliability and budget of projects resulting in delays in timely tasks such as building the R&D facilities.

Typical scheduling methods such as technology roadmap and PERT/CPM are not able to solve the delay problem of large R&D projects due to the nature of the method. It is not possible to consider uncertain development schedules and delays in prior tasks lead to subsequent tasks, especially delayed critical paths

with no safety time.

In this study, considering the fact that the technology readiness level is related to the development period of large R&D projects and that it can prevent the delay by buffering the activity with high schedule risk, we developed a scheduling methodology that computes a probabilistic distribution of large-scale R&D projects, buffers the project and prevents delay and facilitates project management.

In the methodology, the elemental technologies of the target system are searched and the development time, technology readiness level, and schedule risk level are evaluated by experts. Next, probabilistic delay was calculated using the Monte Carlo method. When the basic schedule is determined by taking into consideration the post-assembly relationship of the final system calculated for each activity, the difference between the basic schedule and the first schedule from which the spare time is removed is compared and the difference is stored in the buffer. In the case of a critical chain, it is put into the project buffer. In case of noncritical chain, it is set as a feeding buffer. Lastly, the calculated schedule is revised and supplemented by referring to the R&D device construction plan, which is a major constraint factor of large R&D projects.

To verify the feasibility of the developed methodology, it was verified using KSTAR project schedule data.

First, the technology readiness level and the risk level of the

technology were evaluated using the initial plan of the KSTAR project, and the probabilistic schedule distribution of the KSTAR project was calculated using the Monte Carlo method.

As a result, we found that the initial plan of KSTAR was a very high risk plan, and the first and second modified plan showed a schedule risk reduction. The reason for this is analyzed as the low risk due to the early embarkation of design and manufacturing R&D at the time.

Next, this methodology is applied for DEMO scheduling. DEMO technology system and development time are obtained, and probabilistic schedule distribution is calculated by considering technical readiness level and schedule risk level. We evaluated the schedule risk with respect to the R&D constraints and it was confirmed that the delay of DEMO development was affected by the increase of the schedule risk value. Based on the KSTAR project case, it is necessary to lower the schedule risk by carrying out early embarkation of DEMO design and manufacturing R&D.

On the other hand, the methodology developed in this study can be applied to other large-scale R&D project scheduling besides the nuclear fusion energy development project. When the factors such as cost and manpower are included, practical decision making for budget promotion, procurement plan will be possible.

keywords : TRL, Schedule Risk, Critical Chain, Large-Scale R&D
Projects, Scheduling, Nuclear Fusion, KSTAR, DEMO

Student Number : 2009-21048

감사의 글

불빛 하나 없는 캄캄한 터널을 방금 막 지나온 것 같습니다. 긴 터널에도 끝이 있겠지 라는 마음으로 시작했는데, 이 길은 무척이나 힘이 들었고 중간에 멈춰 쉬는 시간이 많아 더 오래 걸렸던 것 같습니다.

학위과정이라는 길에서 만났던 너무나 고마웠던 사람들, 손을 내밀어 이끌어 주신 분들, 용기와 응원을 보내주신 분들, 묵묵히 지켜봐주신 분들에게 감사의 글을 드리려고 합니다.

대학원에서 많은 시간을 보낸 만큼, 감사의 글을 전하고 싶은 사람이 많습니다.

먼저 이 논문을 완성할 수 있게 해주신 지도교수님과 심사위원님들께 감사인사를 드리고 싶습니다.

나용수 지도교수님께 특히 감사드립니다. 훌륭한 제자이고 싶었지만 실제로는 부족한 제자였던 것 같습니다. 학위과정 중 못난 모습을 많이 보여드렸고 마지막까지 걱정을 많이 끼쳐드렸습니다. 그럼에도 부족한 저를 포용해주시고 이끌어 주셔서 감사합니다.

황용석 교수님께 감사드립니다. 교수님 아래에서 정책연구를 할 수 있는 행운을 주시고 학위논문까지 쓸 수 있게 지도해주셔서 감사합니다.

한정훈 박사님께 감사드립니다. 때로는 쓴소리 마다하지 않으시지만 항상 따뜻한 마음으로 부족한 저를 대해주셨던 것 같습니다.

양지원 박사님께 감사드립니다. 아무것도 몰랐던 저에게 정책 연구의 길을 알려주셔서 감사합니다. 박사님께서 말씀해주셨던 소중한 가르침을 되새기며 나아가도록 하겠습니다.

문주현 교수님께 감사드립니다. 제 연구의 부족한 점을 지도해주셔서

논문을 완성할 수 있었습니다.

앞으로 더 크게 성장해 좋은 모습 보여드릴 수 있도록 노력하겠습니다.

할머니와 그리고 부모님께 감사 말씀 올립니다.

저를 낳아주시고 하루하루 끈기 있게 규칙적인 생활을 할 수 있도록 키워주신 부모님께 감사드립니다. 어릴 적에 같은 공간에서 손자로서, 아들로써 시간을 보냈던 그 시간이 소중했던 것임을, 그 때 더 많은 감사의 표현을 했어야 함을, 결혼을 하고 저도 부모가 되어서야 느끼고 있습니다. 그동안 제대로 효도를 못해드린 것이 마음 깊이 남아있지만 앞으로 부모님께 더 많은 효도를 할 수 있도록 노력하겠습니다.

장인장모님에게 감사드립니다.

학위기간 동안 항상 격려해주시고, 친아들처럼 배려해주신 덕에 무사히 학위를 마칠 수 있었습니다. 감사합니다. 그동안 못한 사위역할도 잘해 나가겠습니다.

학위과정 기간 묵묵히 큰 용기와 응원을 보내준 큰누나, 큰자형, 작은 누나, 작은자형, 형님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 무엇보다 사랑하는 아내 주연에게 감사의 글을 전합니다. 부족한 남편 뒷바라지 하며 고생만 하는 것이 항상 마음에 걸렸습니다. 아이들 키우며 옆에서 많이 힘들었을텐데 내색하지 않고 힘껏 내조해주어 감사합니다. 아들 서완 서준아. 힘든 시기에 두 아들 보며 힘을 얻고 논문을 마칠 수 있었던 것 같습니다. 학위논문을 준비한다는 핑계로 함께 많은 시간을 못 보내 미안합니다. 소중한 인연이 되어주어 고맙고, 앞으로 더 많은 시간 함께합시다.

마지막으로 제 연구동료 및 선후배님들에게도 감사의 글을 전합니다. 그리고 자신만의 꿈을 이루기 위해 밤낮으로 노력하는 후배님들께 이렇게 부족한 선배도 해내었으니, 이를 반면교사로 삼으면 충분히 해낼 수 있다는 응원의 글을 전하고자 합니다.

저에게 연구실 생활은 수많은 희망과 좌절의 반복이었던 것 같습니다. 길을 찾았다가 또 그 길을 잃어버리고 방황한 적이 많았습니다. 돌이켜 생각해보면 정해진 길은 어디에도 없었던 것 같습니다.

이제 다시 새로운 시작을 위한 출발선에 서려고 합니다. 먼 여행을 떠나기 전 짐을 싸면서 느끼는 설레임과 두려움을 가지고 있습니다. 새롭고 다양한 경험을 할 수 있다는 생각에 지금 또 당장 달려나가고 싶은 설레임이 있지만, 목적지가 어디인지, 가는 길을 잃어버리지는 않을까 두려움도 있습니다. 그러나 앞으로는 어려움이 있더라도 지금의 연구실 생활, 학위 과정을 돌이켜보며 부딪쳐 헤쳐 나갈 수 있을 것 같습니다.

제가 존경하는 아버지 말씀처럼 매사 단디하며 살아가겠습니다.

감사합니다.